

**Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

**Мельніков Петро Миколайович (Мельников Петр Николаевич, Melnikov Petro)** - Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», науковий співробітник; м. Харків, Україна.

**Чернухін Олександр Юрійович (Чернухин Александр Юрьевич, Chernukhin Oleksandr)** - Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», науковий співробітник; м. Харків, Україна.

УДК 621.319

**В.Е. МАРЦЕНЮК, А.А. ПЕТКОВ**

### **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ТОКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

В настоящее время эксплуатация различных технических средств проводится во все более сложной электромагнитной обстановке. Для проверки надежности эксплуатации технических средств они должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования. Во время эксплуатации технических средств на них воздействуют дестабилизирующие импульсные магнитные поля различной формы, основными из которых являются: колебательная и апериодическая. Целью настоящей статьи является разработка методики выбора оптимальных параметров генератора импульсов тока, который используется для формирования испытательных импульсов магнитного поля. При исследовании использовались методы моделирования переходных процессов в схеме формирования импульсов магнитного поля. По результатам моделирования определялись контролируемые параметры импульса, которые учитывались в банке данных. Использование банка данных обеспечивает следующие функции: проведение выбора параметров элементов схемы при заданных параметрах импульса тока и индуктивности системы поле образования; решение задач исследования формирующих возможностей схемы генератора; выбор оптимальных параметров разрядной цепи по ряду критериев. Создана открытая база данных значений безразмерных элементов разрядной цепи генератора магнитного поля, обеспечивающих формирование импульса тока с различным соотношением временных параметров. Предложена методика параметрического синтеза схемы генератора в режиме формирования апериодических импульсов магнитного поля, использующая сформированную базу данных. Материалы работы могут служить базой для дальнейшего исследования возможности формирования различных импульсов магнитного поля в генераторах с более сложной структурой, включающей рассмотренный генератор.

**Ключевые слова:** техническое средство, электромагнитная обстановка, банк данных, магнитное поле, генератор импульсов тока, апериодический импульс, колебательный импульс.

**В.Є. МАРЦЕНЮК, О.О. ПЕТКОВ**

### **ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА СТРУМУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

У теперішній час експлуатація різних технічних засобів проводиться в усе більш складній електромагнітній обстановці. Для перевірки надійності експлуатації технічних засобів вони повинні піддаватися випробуванням на стійкість до впливу відповідних електромагнітних факторів і, зокрема, впливу імпульсів магнітного поля, що, у свою чергу, вимагає проведення подальших досліджень, які забезпечують розробку й створення сучасного випробувального обладнання. Під час експлуатації технічних засобів на них впливають дестабілізуючі імпульсні магнітні поля різної форми, основними з яких є: коливальна й аперіодична. Метою даної статті є розробка методики вибору оптимальних параметрів генератора імпульсів струму, які використовуються для формування випробувальних імпульсів магнітного поля. При дослідженні використовувалися методи моделювання перехідних процесів у схемі формування імпульсів магнітного поля. За результатами моделювання визначалися контрольовані параметри імпульсу, які вносилися в банк даних. Використання банку даних забезпечує наступні функції: здійснення вибору параметрів елементів схеми при заданих параметрах імпульсу струму й індуктивності системи полеутворення; рішення задач дослідження формуючих можливостей схеми генератора; вибір оптимальних параметрів розрядного кола по ряду критеріїв. Створено відкриту базу даних значень безрозмірних елементів розрядного кола генератора магнітного поля, які забезпечують формування імпульсу струму з різним співвідношенням часових параметрів. Запропоновано мето-

дику параметричного синтезу схеми генератора в режимі формування аперіодичних імпульсів магнітного поля, яка використовує сформовану базу даних. Матеріали роботи можуть слугувати базою для подальшого дослідження можливості формування різних імпульсів магнітного поля в генераторах з більш складною структурою, яка включає розглянутий генератор.

**Ключові слова:** технічний засіб, електромагнітна обстановка, банк даних, магнітне поле, генератор імпульсів струму, аперіодичний імпульс, коливальний імпульс.

*V. MARTSENIUK, A.A. PETKOV*

## SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE CURRENT GENERATOR FOR FORMING MAGNETIC FIELD TEST PULSES

Currently, the operation of various technical means is carried out in an increasingly complex electromagnetic environment. To verify the reliability of the operation of technical equipment, they must be tested for resistance to the effects of appropriate electromagnetic factors and, in particular, to the effects of magnetic field pulses, which, in turn, requires further research to ensure the development and creation of modern testing equipment. During the operation of technical equipment, they are affected by destabilizing pulsed magnetic fields of various shapes, the main ones are: vibrational and aperiodic. The purpose of this article is to development of a method for selecting the optimal parameters of a current pulse generator, which is used to form test magnetic field pulses. In the research, methods were used to simulate transients in a circuit for generating magnetic field pulses. Based on the simulation results, the controlled impulse parameters were determined, which were which were recorded in the data bank. Using the data bank provides the following functions: selection of parameters of circuit elements at given parameters of the current pulse and the field formation system inductance; solving the problems of researching the forming capabilities of the generator circuit; selection of optimal parameters of the discharge circuit according to a number of criteria. An open database of values of dimensionless elements of the discharge circuit of a magnetic field generator has been created, which ensures the formation of a current pulse with a different ratio of time parameters. The technique of parametric synthesis of the generator circuit in the mode of formation of aperiodic magnetic field pulses using the generated database is proposed. The materials of this work can serve as a basis for further research on the possibility of the formation of various magnetic field pulses in generators with a more complex structure, including generator that has been reviewed.

**Keywords:** technical tool, electromagnetic environment, data bank, magnetic field, current pulse generator, aperiodic pulse, vibrational pulse.

**Введение.** Интенсификация грозовой деятельности, которая является источником природных электромагнитных явлений, и электромагнитных процессов, возникающих в результате деятельности человека, приводит к тому, что в настоящее время эксплуатация различных технических средств (ТС) проводится во все более сложной электромагнитной обстановке.

Для проверки надежности эксплуатации ТС должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования.

Во время эксплуатации ТС на них воздействуют дестабилизирующие импульсные магнитные поля различной формы, например [1-4], основными из которых являются: колебательная и аперіодическая.

Формальное описание таких импульсов может быть представлено в виде строки-описания формы (SOF) [5, 6]:

$$SOF = (P) + (E) + (N), \quad (1)$$

где  $(P) = \{1; 2\}$  – символ, определяющий полярность импульса;

$(E) = \{k_e; \infty\}$  – символ, определяющий количество экстремумов,  $k_e \geq 1$ ;

$(N) = \{k_0; \infty\}$  – символ, определяющий количество переходов через «0»,  $k_0 \geq 0$ .

Для сопоставления формы импульса с параметрами схемы, при которых имеет место данная форма, используется строка-описание параметров (SOP) [5] в виде наборов: (параметр схемы)  $\in$  (интервал значений).

Формирование импульсов магнитного поля осуществляется с использованием специальных электромагнитных систем, по которым протекают импульсы тока соответствующей формы (например [1, 7, 8]). Одна из схем, которые рекомендуются в ряде нормативных документов для формирования импульса магнитного поля, показана на рис. 1.

В [5] показано, что в схеме (см. рис. 1) в индуктивной нагрузке  $L_H$  могут быть сформированы импульсы тока различной формы. На рис. 2 показаны характерные формы импульсов тока (соответственно импульсы магнитного поля), которые реализуются в схеме (см. рис. 1): униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (см. рис. 2, а), колебательный сильно затухающий импульс (см. рис. 2, б) и колебательный слабо затухающий импульс (см. рис. 2, в).

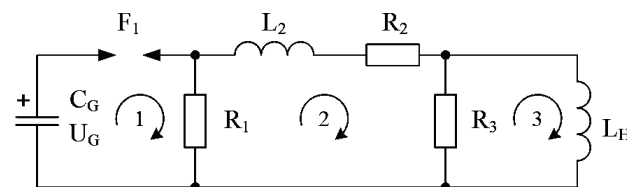


Рисунок 1 – Схема генератора импульсов магнитного поля:

$U_G, C_G$  – напряжение зарядки и емкость генератора,  
 $F_1$  – коммутатор,  $R_1, R_2, R_3$  – формирующие резисторы,  
 $L_2$  – формирующая индуктивность,  
 $L_H$  – индуктивность системы полеобразования

На рис. 2 показаны следующие контролируемые при испытаниях амплитудно-временные параметры импульса тока:  $i_{\max}$  – максимальное значение импульса тока,  $i_{e2}$  – максимальное значение первой отрицатель-

ной полуволны (второе экстремальное значение тока),  $i_{e3}$  – максимальное значение второй положительной полуволны (третье экстремальное значение тока),  $T_{H(0,1;0,9)}$  – время нарастания импульса тока между уровнями  $0,1i_{\max}$  и  $0,9i_{\max}$ ,  $T_{I\ 0,5}$  – длительность импульса тока на уровне  $0,5i_{\max}$ . В практике испытаний имеют место и иные способы определения временных параметров, которые характеризуют нарастание значений импульса и его длительность.

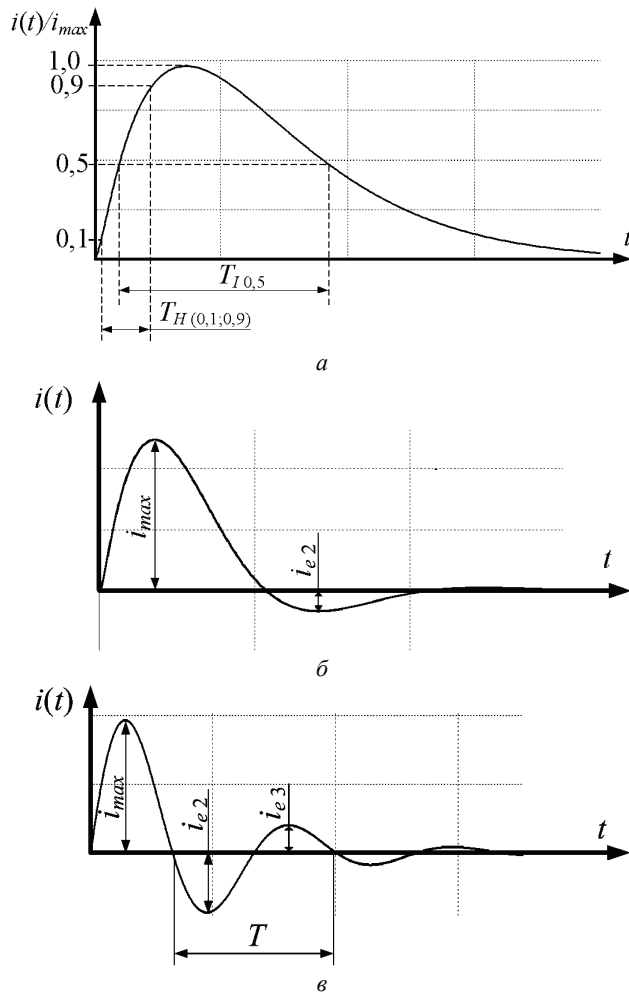


Рисунок 2 – Характерные импульсы тока

Под сильно затухающим колебательным импульсом тока (см. рис. 2) понимается импульс, для которого величина максимального значения второй положительной полуволны составляет не более 1 % от максимального тока в импульсе. Таким образом, для импульсов этого класса выполняется соотношение

$$i_{e3} / i_{\max} \leq 0,01. \quad (2)$$

Для импульсов сильно затухающей (см. рис. 2, б) и слабо затухающей колебательной формы (см. рис. 2, в) определение контролируемых параметров, показанных на рис. 2, а, применяется к первой полуwave, которая должна иметь положительную полярность.

Для определения областей, в которых формируются характерные импульсы тока в системе полеобразования (нагрузке  $L_H$ ), было проведено численное мо-

делирование, базирующееся на использовании безразмерных величин, определяющих переходный процесс [9]:  $\tau = t / \sqrt{L_H C_G}$  – безразмерный аналог времени;  $r_k = R_k / \sqrt{L_H / C_G}$ ,  $k = \overline{1, 3}$  – безразмерные ана-

логи активных сопротивлений;

$I_J = \frac{i_J}{U_G} \sqrt{\frac{L_H}{C_G}}$ ,  $J = \overline{1, 3}$  – безразмерные аналог контурных токов; где  $i_J$  – контурные токи;  $J$  – номер контура (направление обхода контуров показано на рис. 1);  $L_{2H} = L_2 / L_H$  – безразмерный аналог индуктивности.

В результате исследования были определены области, в которых в нагрузке  $L_H$  формируются импульсы тока одной из характерных форм (рис. 3).

Как показано в [5], для аperiodического импульса тока отношение  $T_{I\ 0,5} / T_{H(0,1;0,9)}$  имеет ограничение снизу. Поэтому для испытаний импульсами с меньшим отношением временных параметров используют сильно затухающие колебательные импульсы тока.

Возможность использования при испытаниях различных форм импульса тока определяется тем, что основные эффекты, связанные с воздействием магнитного поля на объекты, проявляются при заданных временных параметрах для импульсов различных видов. Естественно этот факт должен быть предварительно подтвержден теоретическими и / или экспериментальными исследованиями для конкретного типа испытываемых объектов.

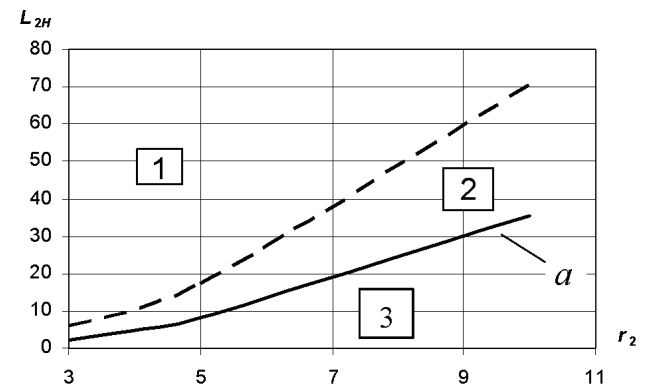


Рисунок 3 – Разделение областей формирования одно- и двухполярных импульсов тока: 1 – область формирования колебательных слабо затухающих импульсов тока; 2 – область формирования колебательных сильно затухающих импульсов; 3 – область формирования унipoлярных импульсов с монотонным нарастанием и спадом значений; а – граница унipoлярности формируемого импульса.

Как видно из проведенного анализа, рассмотренная схема генератора обладает широкими возможностями регулирования контролируемых параметров формируемого импульса тока (соответственно параметров импульса магнитного поля). Однако в литературе для данного генератора, кроме общих рекомендаций и ограниченного ряда соотношений параметров элементов, например [7], отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие при любых соотношениях

контролируемых параметров импульсов магнитного поля, выбрать формирующие элементы разрядной цепи, что существенно затрудняет процесс его проектирования.

Учитывая многовариантность реализации требуемых испытательных импульсов тока (магнитного поля), оправдана постановка задачи о выборе оптимальных значений параметров схемы разрядной цепи генератора, представленной на рис. 1.

**Целью** настоящей статьи является разработка методики выбора оптимальных параметров генератора импульсов тока, который используется для формирования испытательных импульсов магнитного поля.

**Основные материалы исследований.** Для реализации поставленной цели предлагается использовать банк данных, структурная схема которого показана на рис. 4.

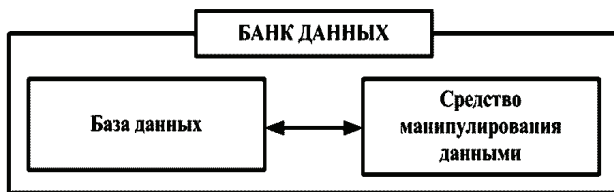


Рисунок 4 – Структурная схема банка данных

База данных представляет собой совокупность систематизированных результатов расчетов, доступных для обработки на ЭВМ представленную в виде записей, которые содержат следующую информацию (см. рис. 5):

а) строку-описание формы импульса тока – *SOF* (см. (1));

б) набор значений безразмерных параметров элементов схемы генератора, при которых реализуется данная форма импульса тока;

в) набор значений безразмерных контролируемых параметров импульса тока и их отношение, соответствующие данному набору безразмерных параметров элементов схемы генератора.

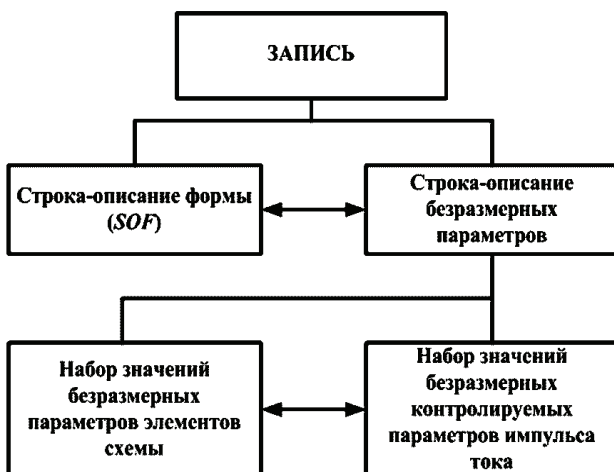


Рисунок 5 – Структура записи в базе данных

Элементы записи б) и в) в совокупности представляют собой строку-описание параметров (*SOP*).

Процедура формирования базы данных включает:

- генерирование исходных данных (безразмерных параметров схемы) исходя из практической необходимости процессов испытаний;

- проведение расчета переходного процесса с использованием системы схемотехнического моделирования (например, Micro Cap [10]);

- определение контролируемых параметров импульса тока, протекающего в системе полеобразования (например, как возможный вариант (безразмерные величины): максимальное значение тока –  $I_{\max}$ , время нарастания тока до максимального значения –  $\tau_H$ , длительность импульса –  $\tau_I$ ).

Исходные данные и определенные контролируемые параметры передаются в средство манипулирования данными (например, табличный процессор *Excel* [11]), чем завершается создание банка данных (совокупность базы данных и средств манипулирования данными). Следует отметить, что банк данных является открытой структурой и может в любой момент пополняться (объем базы данных определяется только возможностями компьютера).

Использование банка данных обеспечивает следующие функции:

а) проведение выбора параметров элементов схемы при заданных параметрах импульса тока и индуктивности системы поле образования (анализ процессов в разрядной цепи генератора);

б) решение задач исследования формирующих возможностей схемы, показанной на рис. 1 (влияние параметров разрядной цепи на форму импульса);

в) выбор оптимальных параметров разрядной цепи по следующим критериям:

- минимизация запасаемой энергии;
- минимизация величины зарядного напряжения;
- техническая реализуемость формирующих элементов разрядной цепи.

Рассмотрим выбор оптимальных параметров при параметрическом синтезе разрядной цепи в режиме генерирования аperiodических импульсов тока. Аналитическая постановка данной задачи рассмотрена в [12].

Аperiodический импульс тока определяется следующими амплитудно-временными параметрами:  $i_{\max}$  – максимальное значение тока,  $T_H$  – время, характеризующее нарастание значений импульса,  $T_I$  – время, характеризующее длительность импульса. В частном случае возможный вариант определения указанных параметров, показан на рис. 2, а.

С практической точки зрения, аperiodическим импульсом можно считать любой из импульсов, показанных на рис. 2, для которого выполняется условие

$$|i_{e2} / i_{\max}| \leq \delta, \quad (3)$$

где  $0 \leq \delta < 1$  – наперед заданное значение, которое определяется условиями проведения испытаний и обычно не превышает значения 0,1.

Параметрический синтез начинается, исходя из имеющейся базы данных, с формирования набора ак-

туальных записей. Актуальной записью будем называть запись, которая одновременно удовлетворяет следующим условиям:

$$\begin{cases} |i_{e2}/i_{\max}| \leq \delta; \\ (\tau_I/\tau_H)_{ZAP} \in [(\tau_I/\tau_H)_{\min}, (\tau_I/\tau_H)_{\max}] \end{cases} \quad (4)$$

где  $(\tau_I/\tau_H) = (T_I/T_H)_{ZAP}$  – отношение параметра, характеризующего длительность импульса к параметру, характеризующему его нарастания в актуальной записи;

$(\tau_I/\tau_H)_{\min} = (T_I/T_H)_{\min} = (T_I - \Delta T_I)/(T_H + \Delta T_H)$  – минимальное запрашиваемое значение отношения;

$(\tau_I/\tau_H)_{\max} = (T_I/T_H)_{\max} = (T_I + \Delta T_I)/(T_H - \Delta T_H)$  – максимальное запрашиваемое значение отношения;

$\Delta T_I, \Delta T_H$  – абсолютное допускаемое отклонение соответственно параметра, характеризующего длительность импульса и параметра, характеризующего его нарастание от их номинальных значений.

Таким образом, совокупность актуальных записей представляет собой набор вариантов безразмерных параметров элементов схемы (рис. 1), при которых в нагрузке формируется импульс тока с требуемыми отношениями амплитудно-временных параметров.

Наличие такого набора позволяет решить ряд задач для оптимизации разрядной цепи генератора импульсов магнитного поля. Для этого для каждой актуальной записи определяется напряжение зарядки емкостного накопителя энергии, его емкость и запасаемая энергия исходя из следующих соотношений [5]:

$$U_G = L_H \frac{i_{3\max}}{I_{3\max}} \frac{\tau_{H(0,1;0,9)}}{T_{H(0,1;0,9)}}; \quad (5)$$

$$C_G = \frac{1}{L_H} \left( \frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} \right)^2; \quad (6)$$

$$W_G = \frac{C_G U_G^2}{2}, \quad (7)$$

а также реальные параметры схемы (см. рис. 1) по следующим соотношениям, полученным исходя из выражений для безразмерных параметров схемы

$$L_2 = L_{2H} L_H; \quad (8)$$

$$R_k = r_k \sqrt{L_H/C_G}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

Если набор содержит одну актуальную запись, то ее следует признать оптимальной. При наличии в наборе более одной актуальной записи можно произвести выбор варианта с минимальной запасаемой энергией емкостного накопителя, с минимальным напряжением его зарядки.

При использовании табличного процессора *Excel* процедура выбора актуальной записи с минимальными значениями параметров наиболее просто реализуется с использованием оператора сортировки данных или функции МИН.

При наличии в наборе более двух актуальных записей дополнительно можно выбрать вариант с минимальным напряжением зарядки.

На последнем этапе производится выбор варианта с параметрами элементов (определенными по соот-

ношениям (6), (8) и (9)), которые имеют наименьшие затраты и наиболее просты в технической реализации.

**Выводы.** Создана открытая база данных значений безразмерных элементов разрядной цепи генератора магнитного поля, обеспечивающих формирование импульса тока в системе полеобразования с соотношением временных параметров

$$\tau_{I0,5}/\tau_{H(0,1;0,9)} = 2,3 \dots 13,3.$$

Предложена методика параметрического синтеза схемы генератора в режиме формирования апериодических импульсов магнитного поля, использующая сформированную базу данных.

Материалы работы могут служить базой для дальнейшего исследования возможности формирования различных импульсов магнитного поля в генераторах с более сложной структурой, включающей рассмотренный генератор.

#### Список литературы

1. IEC 61000-4-9, Ed. 2.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Impulse magnetic field immunity test. IEC, 2016. 114 p.
2. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.
3. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 296 с.
4. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. Москва: Радио и связь, 1991. 264 с.
5. Петков А.А. Формирующие возможности генератора импульсов магнитного поля. Электротехника и электромеханика. 2015. № 2. С. 68-71.
6. Кравченко В.И., Колиушко Г.М., Петков А.А. Взаимосвязь структуры высоковольтных импульсных устройств и формы генерируемых импульсов. Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г.: тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. С. 119-120.
7. ДСТУ 2526-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги та методи випробувань : Держстандарт України. Київ: 1994. 26 с.
8. ДСТУ 2525-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого змінного магнітного поля. Технічні вимоги та методи випробувань : Держстандарт України. Київ: 1994. 28 с.
9. Петков А.А. Генерирование испытательных импульсов магнитного поля. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Харків: НТУ «ХПІ». 2006. №37. С. 73-78.
10. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. Москва: Горячая линия-Телеком, 2003. 368 с.
11. Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика: пер. с англ. Киев: Издательская группа BVH, 2000. 704 с.
12. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. Электротехника і електромеханіка. 2007. № 6. С. 70-75.

**References (transliterated)**

1. IEC 61000-4-9, Ed. 2.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Immunity magnetic field immunity test. IEC, 2016. 114 p.
2. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.
3. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim i jelektromagnitnym izlucheniham [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing and electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 296 p.
4. Kravchenko V.I. Grozozaschita radioelektronnyh sredstv: Spravochnik [Lightning protection of radio electronic means: Directory] Moscow: Radio and communications Publ., 1991. 264 p.
5. Petkov A.A. Formiruyushchiye vozmozhnosti generatora impul'sov magnitnogo polya [Formative capabilities of the magnetic field pulse generator] Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015. № 2. P. 68-71.
6. Kravchenko V.I., Koliushko G.M., Petkov A.A. Interconnection structure of high impulse device and forms generated pulses. Fizika impulsnyh razryadov v kondensirovannyh sredah : mezhdunar. nauch. konf., 17-21 avgusta 2009 g. : tezisy dokl. [Physics of pulsed discharges in condensed media: Intern. scientific. Conf., 17-21 August 2009: Abstracts]. Nikolaev: 2009. P. 119-120.
7. DSTU 2526-94. Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods]: Gosstandart of Ukraine. Kyiv: 1994. 26 p.
8. DSTU 2525-94. Sumisnist' tekhnichnykh zasobiv elektromagnitna. Stiykist' do zahasayuchoho zminnoho mahnitnoho polya. Tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvan' [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to damping alternating magnetic field. Technical requirements and test methods] : Derzhstandart Ukrayiny. Kyiv: 1994. 28 p.
9. Petkov A.A. Generirovanie ispytatelnyh impulsov magnitnogo polya [The generation of test pulses of magnetic field]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage.] Kharkiv: NTU "KhPI". No.37. P. 73-78.
10. Razevig V.D. Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye s pomoshch'yu Micro-Cap 7 [Circuit simulation using Micro-Cap 7]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2003. 368 p.
11. Kottingkhem M. Excel 2000: rukovodstvo razrabotchika [Excel 2000: Developer's Guide] : per. s angl. Kyiv: Izdatel'skaya gruppa BVH, 2000. 704 p.
12. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametric synthesis of high-voltage pulse test device with a capacitive energy storage. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2007. No.6. P. 70-75.

Поступила (received) 31.10.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Марценюк Валентина Євгенівна (Марценюк Валентина Евгеньевна, Martseniuk Valentyna)** – НТУ «ХПІ», старший викладач кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4282>; e-mail: [v.e.martseniuk@gmail.com](mailto:v.e.martseniuk@gmail.com)

**Петков Олександр Олександрович (Петков Александр Александрович, Petkov Alexander Alexandrovich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», професор кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0101-0089>; e-mail: [alexpetkov2014@gmail.com](mailto:alexpetkov2014@gmail.com)

УДК 621.314

**А.С. МАСЛІЙ, Н.П. КАРПЕНКО, О.Г. ТУРЕНКО, О.Е. САФРОНОВ, П.А. ГОЛОВКО****МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗУ**

Дана стаття присвячена дослідженню відносно нового типу електродвигуна: вентильно-індукторного на маневровому тепловозі. Даний двигун відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. На основі рівнянь Лагранжа була описана математична модель даного електромеханічного перетворювача, а також проводився комплекс цифрових експериментів з метою визначення залежностей між потокозчепленням фаз двигуна і їх похідними. За результатами аналізу магнітного поля методом кінцевих елементів були визначені значення потокозчеплення фаз вентильно-індукторного двигуна і значення електромагнітного моменту. За допомогою програмного середовища FEMM були отримані тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від магніторушійної сили та кута повороту ротора, які в подальшому використані в імітаційній моделі вентильно-індукторного двигуна в середовищі Matlab. Проведено ідентифікацію параметрів двигуна ДВІ-165 та отримано його математичну модель на основі рівнянь Лагранжа II роду. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску, а саме моменту, струму та швидкості з обмеженням струму на рівні 600А.

**Ключові слова:** вентильно-індукторний двигун; електромеханічний перетворювач; маневровий тепловоз; імітаційна модель; метод кінцевих елементів; електронний комутатор.